

КВЧ И СВЧ УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР: РОЛЬ ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В.Ф. Взятыйшев, Ю.И. Орехов, С.М. Смольский

(Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ», vitaidea@yandex.ru)

MICROWAVE AND MILLIMETER-WAVE DEVICES ON THE BASIS OF DIELECTRIC STRUCTURES: THE ROLE OF DIFFRACTION WAVE PROCESSES

V.F. Vziatyshev, Yu.I. Orekhov, S.M. Smolskiy

Обсуждаются методы классификации и декомпозиции дифракционных устройств и систем (ДУС) на базе КВЧ и СВЧ диэлектрических структур (ДС) [1]. Дано описание ключевых дифракционных явлений, лежащих в основе действия узлов и элементов ДУС.

Лаборатория диэлектрических структур МЭИ, занимающаяся проектом РФФИ по гранту №11-08-01249а, включающая авторов доклада и группу аспирантов и студентов, представляет серию из трех докладов в этом направлении, посвященных последним результатам.

Опыт авторов имеет **междисциплинарную и проектно-технологическую** специфику:

- Они, по прямой инициативе академика В.А. Котельникова (1956 год), многие годы занимались поиском методов канализации миллиметровых и субмиллиметровых волн. По большей части - в области открытых направляющих структур, выполненных из диэлектрика, называемых далее диэлектрическими структурами (ДС) [2].
- Междисциплинарные обобщения этих работ, начатые еще в 1979 году в рамках общесоюзной программы «СВЧ», послужили толчком к формированию фундаментального инженерного направления «Методология инженерного проектирования (МИП)» [3].

1. Источник задачи - исследовательский проект ДУС

Источником ключевых идей доклада стали работы авторского коллектива, начатые в 2007 году по проекту под названием «**Дифракционные радиотехнические устройства и системы: фундаментальные основы и перспективы повышения эффективности функционирования**» (далее проект ДУС-1, грант РФФИ № 08-08-00992а). По нему опубликованы 24 статьи и 45 докладов на 12 конференциях, выпущено шесть томов хозяйственных отчетов с приложениями результатов проекта ДУС, а также итоговый заключительный отчет.

По итогам этих работ был сформулирован и одобрен более конкретный Проект «**Дифракционные радиотехнические устройства и системы: принципы построения и поиск структур, конструкций и обликов**» (далее ДУС-2, грант РФФИ №11-08-01249а).

Проект ДУС-2 уже при его постановке был ориентирован на решение **прикладных инженерных и технологических задач** создания ДУС. Но в настоящем докладе акцент делается на **физико-техническое понимание** задачи. Мы поняли, что начинать нужно с **упорядочения пространства объектов и предметов изучения, а также - признаков их классификации.**

2. Упорядочение пространства объектов и предметов изучения

Работы первого же года проекта ДУС-2 подтвердили основной вывод 2010 года: ДУС в целом ряде ситуаций оказываются по совокупности показателей качества более эффективными, чем устройства, не использующие в своем принципе действия явления дифракции с их специфическими закономерностями. Было установлено, что ДУС наиболее выигрышны в тех случаях, когда они выполняются из диэлектрических материалов, т.е. когда дифракция происходит на **диэлектрических объектах.**

2.1. *От рассеяния – к направлению и обратно.* И здесь мы вынуждены были по-новому посмотреть на область, которая первоначально была **противоположна дифракции** (рассеянию). Ведь понятия «**Дифракция**» и «**Волновод**» по физическому смыслу и функциональному назначению – скорее **противоположны, чем схожи:**

- «**Волновод**» служит для того, чтобы принудить волну двигаться по заданной траектории (в том числе и криволинейной).

- О «**дифракции**» же говорят тогда, когда волна отклоняется от первоначального направления движения или даже теряет его, «**рассеиваясь**» в спектр волн.

И, тем не менее, логика развития названных выше двух проектов заставила нас **искать общее** в понятиях ДВ («волновод») и ДУС («дифракция») и объединить их в один комплекс.

2.2. Первый шаг в прозрении – формирование обобщенного видения диэлектрических КВЧ устройств. О таком обобщении было **впервые заявлено** на 148-м семинаре "Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот" (научный руководитель проф. Е.И. Нефёдов). Вот что было написано в информационном сообщении [2] об этом докладе:

«Анализируется история становления и развития уникального класса ... открытых волновых структур, отличающихся тем, что их элементы выполнены из диэлектрика, - **диэлектрических структур (ДС)**. ДС обобщает и объединяет группу частных понятий:

- **диэлектрические волноводы (ДВ)**, включая: многосвязные ДВ;
- **диэлектрические резонаторы (ДР)**, включая: ДР на колебаниях типа шепчущей галереи (ШГДР), позволяющие на порядки увеличить радиационную добротность;
- диэлектрические **функциональные устройства (ФУ)** из отрезков ДВ и ДР, включая многоплечие устройства, степени направленности и согласования в которых уникальны;
- диэлектрические **антенны (ДА)**, степень согласования и уровень боковых лепестков у которых на порядки превосходят показатели других антенн;
- диэлектрические **интегральные схемы (ДИС)**, включая ДИС на диэлектрических щелевых волноводах (ДЩВ) и ДИС на неизлучающих ДВ;
- диэлектрические **дифракционные устройства и волноводно-пучковые преобразователи**, а также их совокупности – **дифракционные системы**.

Реакция аудитории этого научного собрания на доклад [2] оказалась неожиданной.

2.3. Реакция на обобщающий доклад по технологии ДС. Доклад [2] вызвал почти двухчасовую дискуссию. Общая реакция на этот доклад оказалась даже более **серьезная и заинтересованная**¹, чем в эпоху расцвета «физики и техники ДВ» (1970 - 1980-е годы).

Одно из объяснений этого **события** - в следующих утверждениях.

У1. В аудитории присутствовало много инженеров-разработчиков. Реальные задачи - всегда **системны**, и **технология** их решения включает совокупность процедур обоснованного **выбора** в нескольких **разнородных пространствах**:

- выбор в пространстве элементов системы – **функциональных узлов (ПФУ)**;
- выбор в пространстве **волновых** (физических, электродинамических) **явлений (ПВЯ)**;
- в пространстве **обликов и конструкций** объекта проектирования (ПОК),
- а также в множестве принципов построения объектов.

У2. Эффективное выполнение выбора требует достаточного массива сопоставимой информации о названных множествах, а такая информация является **междисциплинарной**.

У3. В докладе [2] декларирован системный, подход, рассматривающий пространства ПФУ, ПФЯ и ПОК в единстве и во взаимовлиянии.

В настоящем докладе будет сделана попытка развить такой подход.

3. Система признаков физико-технической классификации

Обоснование и выбор системы **признаков классификации** – задача весьма непростая.

3.1. Признаки классификации и пространства выбора. Признаки физико-технической классификации (ПФТК) связаны с принципами организации пространств выбора (п. 2.3). Перепишем их в несколько иной формулировке:

ПФТК-1. **Функциональное назначение объекта** и совокупность требований к нему.

ПФТК-2. **Принцип действия объекта** – волновое явление (ВЯ) или совокупность ВЯ, которые обеспечивают его функционирование.

ПФТК-3. **Облик (конструкция) объекта** – его качественное описание, которое, совместно с совокупностью параметров определяет его свойства и возможность изготовления.

Рассмотрим названные группы признаков последовательно.

¹ Многие из выступающих на этом семинаре описывали актуальные и сложные проектные задачи. Надеюсь, что их можно решить с применением ДС, они спрашивали, как именно это можно сделать.

3.2. Волновая передача КВЧ сигнала по заданной траектории включает варианты.

1) **Направление волны по прямолинейной траектории** включает три явления:

- явление **распространения** рабочего типа волны в регулярном волноводе;
- явление **диссипативного затухания** рабочей волны из-за неидеальности диэлектрика;
- явление **дифракционного рассеяния** рабочей волны на внешних предметах.

2) **Направление волны по криволинейной траектории** требует добавить изогнутые участки, а в принцип действия войдут еще два или даже три явления:

- **радиационное затухание** рабочей волны (возбуждение «вытекающей» волны);
- **дифракция на стыках** участков НС с различными радиусами кривизны;
- **связь** различных криволинейных участков НС - за счет волн излучения.

3) Если на разных участках **поляризацию** рабочей волны желательно иметь **различной**, в систему ФУ добавляют скрученные участки, а в принцип действия войдут явления:

- **распределенная связь между** волнами с различной поляризацией;
- явление **перекачки энергии** между ортогональными волнами;
- **интерференция** («попутная») между волнами НС, движущимися в одном направлении.

4) **Влияние нерегулярностей**. Если НС содержит еще и переходы на другие типы НС, включая и металлические волноводы, в систему ФУ может потребоваться добавить **плавные** переходные участки, а в ее принцип действия войдут новые группы явлений:

- Явления **дифракции на нерегулярных участках** (НУ) - образование волн других типов («попутных», движущихся в ту же сторону, что и рабочая волна, и «встречных», движущихся в противоположную сторону), а также волн излучения;
- **Явления интерференции** между разными волнами;
- Явление «радиационной» связи нерегулярных участков НС за счет волн излучения.

Перечисленные явления имеют место даже при передаче волнового сигнала по заданной траектории. В более сложных проектных ситуациях принципы действия ФУ на ДС становятся значительно более системными и не столь очевидными.

3.3. Обработка КВЧ сигналов. Системы для обработки волновых сигналов содержат дополнительно большой **набор функциональных узлов** (ФУ), включая: делители и сумматоры сигналов, ФУ управления амплитудой и фазой, преобразователи частоты и пр. Строго говоря, почти все эти ФУ, и особенно – при выполнении их на диэлектрических структурах (ДС), можно назвать **дифракционными**. И вот на каких основаниях.

1) У разработчиков ФУ на ДС в ходу поговорка: «ФУ – это **совокупность нерегулярностей**». Весь наш опыт в технологиях ДС подтверждает это положение.

2) На каждой из них имеют место **дифракционные явления** (ДЯ). А у ФУ на ДС, в связи с особенностями их спектра собственных волн (наличие второй распространяющейся волны, вытекающих волн и волн излучения), имеет место богатый набор ДЯ.

3) Поэтому при проектировании систем на ДС **корректный учет ДЯ** необходим – как для снижения нежелательных эффектов, так при создании новых специфических ДУС.

Литература

1. Взятых В.Ф., Смольский С.М., Орехов Ю.И. Дифракционные явления и волновые образования: физика процессов и взаимодействий в ближней зоне и принципы действия устройств и систем // «Известия ВУЗов, Физика», 2008, № 9/2, с. 128-133.
2. Взятых В.Ф. Физика и техника диэлектрических структур: этапы понимания и обобщения. // - М.: ИСТО МЭИ. Выпуск ЛДС-02. К обсуждению Проекта ЛДС на Семинаре Е.И. Нефедова (совместно с семинаром ЦИП ПМ-277). 110129, 24 стр.
3. Взятых В.Ф. Зарождение и развитие идей проектирования и менеджмента вокруг Центра инженерного проектирования МЭИ: взгляд кафедры Конструирования и производства радиоаппаратуры // Радиотехнические тетради. - М.: ОКБ МЭИ, 2001, №23, с. 35-45.